

Capítulo I

Conceitos gerais sobre qualidade da energia

Por Gilson Paulilo*

O termo “qualidade da energia” inclui uma gama de fenômenos, abrangendo áreas de interesse de sistemas da energia elétrica até problemas relacionados com a comunicação em redes de transmissão de dados. Dessa forma, devem ser divulgados e reconhecidos por todos os setores envolvidos com o consumo, transmissão e geração de energia elétrica. A interpretação destes fenômenos, principalmente as distorções de tensões e correntes, localizadas tanto nos PACs (ponto de acoplamento comum) como também dentro das instalações dos próprios consumidores de energia, está associada diretamente à correção do fator de potência, racionalização da energia e aumento da produtividade. A ocorrência destes problemas determina a necessidade de uma busca mútua de soluções, entre ambas as partes, para a realização de medidas práticas e econômicas.

De forma geral, a conceituação da perda da qualidade da energia é adotada pelos especialistas da área, como sendo: “qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica, que resulte em falha ou operação indevida de equipamentos elétricos”.

Independentemente da definição e da conceituação, a preocupação tanto por parte das concessionárias quanto pelos consumidores é considerada um assunto técnico emergencial, encontrando respaldo internacional e justificado

pelos motivos a seguir:

- Os equipamentos e maquinários atuais estão mais sensíveis às variações da qualidade da energia em relação aos utilizados no passado. Muitos dos aparelhos modernos contêm controles microprocessados e/ou unidades eletrônicas de potência, tornando-os muito sensíveis a certos tipos de distúrbios, que por décadas podem ter ocorrido sem causar efeitos adversos e, atualmente, resultam em má operação e, sobretudo, redução da vida útil;
- O crescente interesse na racionalização de energia para o aumento da eficiência dos sistemas elétricos resultou em uma crescente aplicação de equipamentos de alta eficiência, acionamentos eletrônicos e bancos de capacitores para a correção do fator de potência. Estas atitudes levaram ao incremento das amplitudes das componentes harmônicas nas redes elétricas e na preocupação generalizada com o impacto destes níveis em um futuro próximo;
- O aumento do interesse dos consumidores pelo assunto “qualidade da energia”. Os consumidores estão tornando-se mais bem informados sobre os efeitos de alguns fenômenos como: interrupções, descargas elétricas e transitórios de chaveamentos. Além disso, estão pressionando as concessionárias para a melhora da qualidade da energia fornecida;
- É crescente a utilização de linhas de comunicações de dados em todos os setores da

sociedade, tornando-se necessárias as operações ininterruptas das transações comerciais e dos processos de controle industriais, associado às tendências futuras com os projetos de redes elétricas inteligentes (smart grids).

Define-se, então, que um serviço de fornecimento de energia elétrica é de boa qualidade quando garante, a custos viáveis, o funcionamento seguro e confiável de equipamentos e processos, sem afetar o meio ambiente e o bem-estar das pessoas.

Observa-se que o conceito apresentado integra os aspectos sociais, ambientais, técnicos e econômicos.

A qualidade do atendimento aborda o aspecto comercial, que trata das relações do cotidiano entre o cliente e o fornecedor de energia; e o atendimento de emergência, que contempla as solicitações do consumidor, quando da ocorrência de contingências na rede elétrica. De um modo geral, a qualidade do atendimento diz respeito à presteza e à eficiência do atendimento da concessionária.

A qualidade do serviço é medida segundo a continuidade do fornecimento da energia elétrica. Assim sendo, do ponto de vista ideal, a qualidade de serviço deveria oferecer continuidade plena e oferta ilimitada de energia elétrica.

Finalmente, a qualidade do produto diz respeito à conformidade do produto “energia elétrica”, que pode ser interpretada como a capacidade do sistema elétrico de fornecer energia com tensões equilibradas e sem deformações de forma de onda. Do ponto de vista ideal, seria a disponibilidade de energia elétrica com tensões senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constantes.

Os desvios do conceito ideal do produto “energia elétrica” apresentados são tratados, em nível internacional, sob o título de Power Quality e Voltage Quality, sendo este último tratado assim no âmbito do Cigré. No Brasil, embora sem uma terminologia totalmente consolidada, o assunto vem sendo tratado sob a denominação de Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

A questão da qualidade, associada ao produto energia elétrica, apresenta características bastante específicas, uma vez que o processo de produção, transporte, distribuição e consumo ocorrem simultaneamente em um sistema físico cada vez mais complexo, sendo que cada fase do processo

pode afetar e ser afetada pelos demais.

O estabelecimento de indicadores para o controle e avaliação do produto “energia elétrica” é bastante complexo e apresenta peculiaridades técnicas que dificultam seu tratamento de forma simples. Dentre as particularidades mencionadas podem-se destacar:

- Caráter aleatório nas ocorrências de distúrbios de QEE;
- Inevitabilidade técnica de ocorrências destes distúrbios;
- Variado nível de sensibilidade dos consumidores, uma vez que cada consumidor percebe a qualidade da energia de forma diferenciada;
- Dificuldade de executar controle prévio da QEE, como ocorre com outros produtos, visto que geração, transmissão, distribuição e consumo da energia ocorrem simultaneamente;
- Extensa área de vulnerabilidade do sistema elétrico, representado por milhares de quilômetros de linhas de transmissão, subtransmissão e distribuições aéreas.

Principais distúrbios associados à qualidade da energia

O termo qualidade da energia elétrica refere-se a uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos conduzidos que caracterizam a tensão e a corrente em um dado tempo e local do sistema elétrico.

A qualidade da energia em uma determinada barra do sistema elétrico é adversamente afetada por uma ampla variedade de distúrbios:

1. Transitórios

Os transitórios são fenômenos eletromagnéticos oriundos de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que submetem equipamentos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente. Existem dois tipos de transitórios: os impulsivos, causados por descargas atmosféricas, e os oscilatórios, causados por chaveamentos.

2. Variações de tensão de curta duração

As variações de tensão de curta duração podem ser caracterizadas por alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias. Tais variações de tensão são, geralmente, causadas pela energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida, ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos de sistema. Dependendo do local da falha e das condições do sistema, o resultado pode ser um afundamento momentâneo de tensão (“sag”), uma elevação momentânea de tensão (“swell”), ou mesmo uma interrupção completa do sistema elétrico.

3. Variações de tensão de longa duração

As variações de tensão de longa duração são fenômenos semelhantes aos fenômenos de curta duração, porém, com a característica de se manterem no sistema elétrico por tempos superiores a três minutos. São causadas por saídas de grandes blocos de carga, perdas de fase, dentre outras.

4. Desequilíbrios

Os desequilíbrios podem ser definidos como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, divididos pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressados em percentual. As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária.

5. Distorções da forma de onda: harmônicos, cortes de tensão, ruídos, etc.

A distorção da forma de onda é definida como um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal, na frequência fundamental, e é caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral. Existem cinco tipos principais de distorções da forma de onda:

- Harmônicos: tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (50 Hz ou 60 Hz) na qual opera o sistema de energia elétrica. Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente e são oriundos de equipamentos e cargas com características não lineares instalados no sistema de energia.
- Inter-harmônicos: componentes de frequência, em tensão ou corrente, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema supridor (50 Hz ou 60 Hz). Elas podem aparecer como frequências discretas ou como uma larga faixa espectral. Os inter-harmônicos podem ser encontrados em redes de diferentes classes de tensão. As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, ciclo-conversores, motores de indução e equipamentos a arco. Sinais "carrier" em linhas de potência também podem ser considerados como inter-harmônicos. Os efeitos deste fenômeno não são bem conhecidos, mas admite-se que podem afetar a transmissão de sinais "carrier" e induzir "flicker" visual no display de equipamentos como tubos de raios catódicos.
- Nível CC: a presença de tensão ou corrente CC em um sistema elétrico CA é denominado "DC offset". Este fenômeno pode ocorrer como o resultado da operação ideal de retificadores de meia-onda. O nível CC em redes de corrente alternada pode levar à saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução da vida útil.
- "Notching": distúrbio de tensão causado pela operação normal

de equipamentos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Este fenômeno pode ser detectado pelo conteúdo harmônico da tensão afetada. As componentes de frequência associadas com os "notchings" são de alto valor e, desta forma, não podem ser medidas pelos equipamentos normalmente utilizados para análise harmônica.

- Ruído: definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 KHz, as quais são superpostas às tensões ou correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro. Os ruídos em sistemas de potência podem ser causados por equipamentos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores a estado sólido e fontes chaveadas que, normalmente, estão relacionados com aterramentos impróprios.

6. Flutuações de tensão

As flutuações de tensão correspondem a variações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento dentro da faixa compreendida entre 0,95 pu e 1,05 pu. Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e manifestam-se de diferentes formas, a destacar:

- Flutuações aleatórias: causadas por fornos a arco, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material e do nível de curto-circuito da instalação.
- Flutuações repetitivas: causadas por máquinas de solda, laminadores, elevadores de minas e ferrovias.
- Flutuações esporádicas: causadas pela partida direta de grandes motores.

Os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados das oscilações causadas pelos equipamentos mencionados anteriormente, são oscilações de potência e torque das máquinas elétricas, queda de

rendimento dos equipamentos elétricos, interferência nos sistemas de proteção, e efeito "flicker" ou cintilação luminosa.

7. Variações de frequência

Variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema (50 Hz ou 60 Hz). A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações de frequência podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração (variações na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$). Variações de frequência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente podem ser causadas por faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração.

Em sistemas isolados, entretanto, como é o caso da geração própria nas indústrias, na eventualidade de um distúrbio, a magnitude e o tempo de permanência das máquinas operando fora da velocidade, resultam em desvios da frequência em proporções mais significativas.

A título de ilustração, a Figura 1 mostra os principais distúrbios envolvendo a qualidade da energia.

Em que:

a - tensão senoidal	f - salto de tensão
b - transitório impulsivo	g - harmônico
c - transitório oscilatório	h - corte de tensão
d - afundamento de tensão	i - ruídos
e - interrupção	j - inter-harmônicos

A Tabela 1 apresenta as categorias mais comuns dos distúrbios, suas causas e algumas soluções práticas.

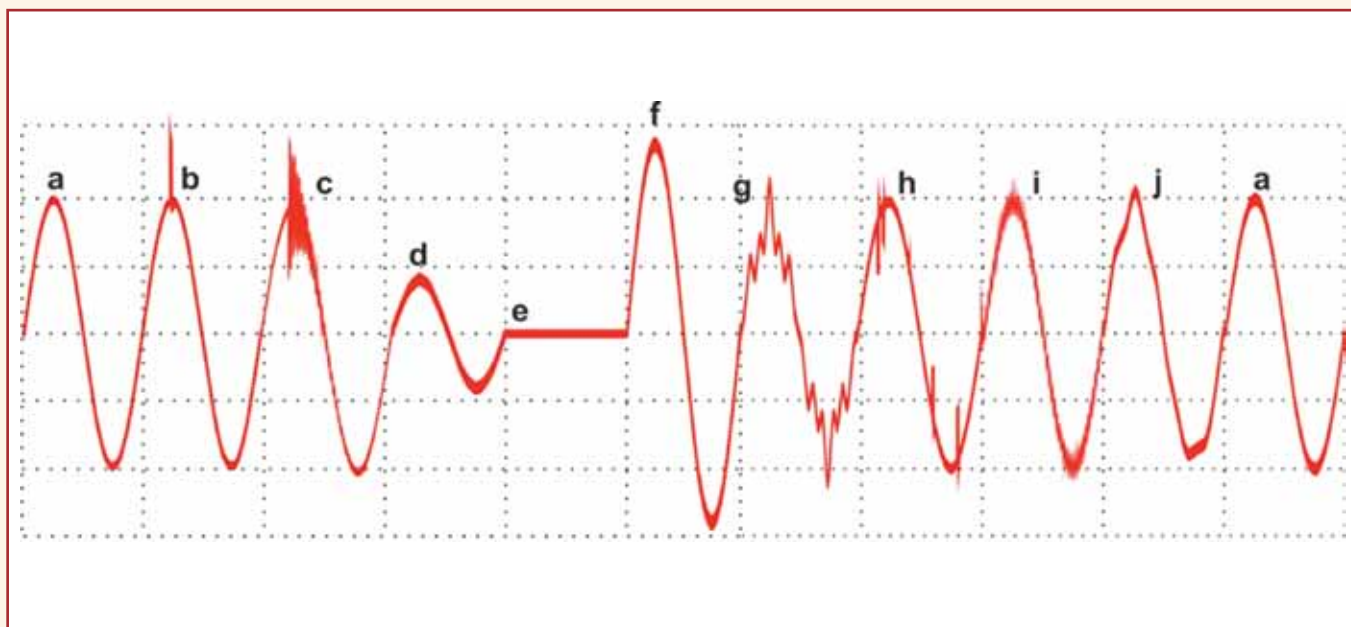


Figura 1 – Principais distúrbios da qualidade da energia elétrica.

TABELA I – CATEGORIAS DE CLASSIFICAÇÃO DOS DISTÚRBIOS ASSOCIADOS À QUALIDADE DA ENERGIA

DISTÚRBIOS	CAUSAS	EFEITOS	SOLUÇÕES
Transitórios impulsivos	<ul style="list-style-type: none"> • Descargas atmosféricas; • Chaveamentos de cargas e/ou dispositivos de proteção. 	<ul style="list-style-type: none"> • Excitação de circuitos ressonantes; • Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.; • Erros de processamento e perdas de sinais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtros; • Supressores de surtos; • Transformadores isoladores;
Transitórios oscilatórios	<ul style="list-style-type: none"> • Descargas atmosféricas; • Chaveamentos de capacitores, linhas, cargas e transformadores; • Transitórios impulsivos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mau funcionamento de equipamentos controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.; • Redução da vida útil de motores, geradores, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtros; • Supressores de surtos; • Transformadores isoladores;
Sub e sobretensões	<ul style="list-style-type: none"> • Partidas de motores; • Variações de cargas; • Chaveamento de capacitores; • TAPs de transformadores ajustados incorretamente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores; • Falhas em equipamentos eletrônicos; • Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TPs e TCs; • Operação indevida de relés de proteção, motores, geradores, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reguladores de tensão; • Fontes de energia de reserva; • Chaves estáticas; • Geradores de energia.
Interrupções	<ul style="list-style-type: none"> • Curto-circuito; • Operação de disjuntores; • Manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falha de equipamentos eletrônicos e de iluminação; • Desligamento de equipamentos; • Interrupção do processo produtivo (altos custos). 	<ul style="list-style-type: none"> • Fontes de energia sobressalentes; • Sistemas “no-break”; • Geradores de energia.
Desequilíbrios	<ul style="list-style-type: none"> • Fornos a arco; • Cargas monofásicas e bifásicas; • Assimetrias entre as impedâncias; • Falta de transposição de linhas de transmissão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas; • Geração, pelos retificadores, de 3º harmônico e seus múltiplos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Operação simétrica; • Dispositivos de compensação.
Nível CC	<ul style="list-style-type: none"> • Operação ideal de retificadores de meia onda, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Saturação de transformadores; • Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e de outros conectores. 	
Harmônicos	<ul style="list-style-type: none"> • Cargas não lineares. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; • Danificação de capacitores, etc.; • Operação indevida de disjuntores, relés, fusíveis, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtros; • Transformadores isoladores; • Reatores de linhas.
Inter-harmônicos	<ul style="list-style-type: none"> • Conversores estáticos de potência; • Cicloconversores; • Motores de indução; • Equipamentos a arco, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Interferência na transmissão de sinais Carrier; • Indução de flicker visual no display de equipamentos. 	
Notching	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos eletrônicos de potência. 	<ul style="list-style-type: none"> • Operação indevida de dispositivos de medição e proteção. 	
Ruídos	<ul style="list-style-type: none"> • Chaveamento de equipamentos eletrônicos de potência; • Radiações eletromagnéticas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distúrbios em equipamentos eletrônicos (computadores e controladores programáveis). 	<ul style="list-style-type: none"> • Aterramento das instalações; • Filtros.
Flutuações de tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Cargas intermitentes; • Fornos a arco; • Partidas de motores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Flicker; • Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas; • Queda de rendimento de equipamentos elétricos; • Interferência nos sistemas de proteção. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas estáticos de compensação de reativos; • Capacitores em série.
Variação de frequência	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de geração, perda de linhas de transmissão, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Danos severos nos geradores e nas palhetas das turbinas, etc. podem ocorrer. 	

A Tabela 2 mostra as categorias e as características típicas de fenômenos eletromagnéticos que contribuem para a perda da qualidade da energia em um determinado sistema elétrico. Grande parte destes fenômenos já recebeu comentários iniciais quando da apresentação da Tabela 1. A Tabela 2 é uma síntese de todos os distúrbios que eventualmente possam ocorrer sobre determinado sistema elétrico, trazendo as principais características pelas quais os fenômenos são definidos. No que segue, a maioria destes distúrbios será novamente apresentada, procurando-se melhor caracterizá-los conforme o seu efeito, duração e intensidade sobre determinado sistema elétrico.

Conforme se verifica com a tabela anterior, a proposta básica para agrupar os fenômenos de qualidade é baseada em

sua duração. Assim tem-se:

- Fenômenos transitórios: são fenômenos de curtíssima duração, podendo ser do tipo impulsivo ou oscilatório;
- Fenômenos temporários: são fenômenos que envolvem a variação da tensão eficaz da rede durante algum período de tempo. Dependendo deste período são denominados variações de curta duração, compreendendo as instantâneas (0,5 – 30 ciclos), as momentâneas (30 ciclos – 3 s) e as temporárias (3 s – 1 min) ou variações de longa duração, para períodos acima de 1 minuto;
- Fenômenos a regime permanente: correspondem aos fenômenos de regime permanente e que ficam superpostos à frequência fundamental da rede, compreendendo os

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DA ENERGIA

CATEGORIAS	CONTEÚDO ESPECTRAL	DURAÇÕES	MAGNITUDES
Transitórios			
Impulsivos			
ns	Frente de 5 ns	< 50 ns	
µs	Frente de 1 µs	50 ns – 1 ms	
ms	Frente de 0,1 ms	> 1 ms	
Oscilatórios			
Baixa frequência	< 5 kHz	0,3 – 50 ms	0 – 4 pu
Média frequência	5 – 500 kHz	20 µs	0 – 8 pu
Alta frequência	0,5 – 5 MHz	5 µ	0 – 4 pu
Variações de tensão de curta duração			
Instantânea			
Interrupção		0,5 – 30 ciclos	< 0,1 pu
Afundamento		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
Elevação		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
Momentânea			
Interrupção		30 ciclos – 3 s	< 0,1 pu
Afundamento		30 ciclos – 3 s	0,1 – 0,9 pu
Elevação		30 ciclos – 3 s	1,1 – 1,4 pu
Temporária			
Interrupção		3 s – 1 min	< 0,1 pu
Afundamento		3 s – 1 min	0,1 – 0,9 pu
Elevação		3 s – 1 min	1,1 – 1,2 pu
Variações de tensão de longa duração			
Interrupção sustentada		> 1 min	0,0 pu
Subtensão sustentada		> 1 min	0,8 – 0,9 pu
Sobretensão sustentada		> 1 min	1,1 – 1,2 pu
Desequilíbrio de tensão		Regime permanente	0,5 – 2%
Distorção da forma de onda			
Nível CC		Regime permanente	0 – 0,1%
Harmônicos	0 – 100 H	Regime permanente	0 – 20%
Inter-harmônicos	0 – 6 kHz	Regime permanente	0 – 2%
Notching		Regime permanente	
Ruído		Regime permanente	0 – 1%
Flutuação de tensão		Intermitente	0,1 – 7%
Variações de frequência		< 10 s	

desequilíbrios de tensão, as distorções na onda e as flutuações de tensão, este último de caráter intermitente.

Instituições internacionais e normas

As principais instituições internacionais que buscam analisar os problemas associados à qualidade da energia são:

- IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers;
- IEC – International Electrotechnical Commission;
- CIGRE – Grand Réseaux Électriques a Haute Tension;
- ANSI – American National Standards Institute.

Estas instituições, além de outras, elaboraram uma série de normas e recomendações para analisar os problemas da qualidade da energia:

- ANEEL: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica;
- ONS: Padrões de Desempenho da Rede Básica – Submódulo 2.2;
- CURVA CBEMA (ITIC): documento recomendado aos fabricantes de equipamentos eletrônicos;
- NORMA EUROPEIA – EN50160: define e descreve as características da tensão com relação à frequência, amplitude

forma de onda e simetria;

- NORMA IEEE – 519: concentra-se na divisão de responsabilidades do problema de harmônicos entre os consumidores e a concessionária. É aplicada de forma mais apropriada aos grandes sistemas industriais;
- NORMA IEC – 555: documento voltado ao estabelecimento de limites para os harmônicos gerados pelos equipamentos eletrônicos de baixa potência;
- NORMA IEC – 61000: referência mundial para as medições do nível de harmônicos em sistemas de distribuição.

** GILSON PAULILO é engenheiro eletricista, com mestrado e doutorado em Qualidade de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá. Atualmente, é consultor tecnológico em energia no Instituto de Pesquisas Eldorado, em Campinas (SP). Atuação voltada para áreas de qualidade de energia elétrica, geração distribuída, eficiência energética e distribuição.*

Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redação@atitudeeditorial.com.br